

## 周期的に配置された防振杭の深さが 表面波分散特性に及ぼす影響

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 古里 駿  
 新潟大学工学部建設学科 正会員 阿部 和久  
 新潟大学大学院自然科学研究科 正会員 紅露 一寛  
 新潟大学災害・復興科学研究所 正会員 Pher Errol Balde QUINAY

### 1. はじめに

地下施設の振動や走行車両の荷重により発生する地盤振動の中でも、地表面に沿って伝播する表面波やそれが実体波と共振することで生まれる擬表面波は減衰しにくい為、波源から離れた構造物や環境に影響を与える恐れがある。これに対し、埋設物や溝を作り人為的に振動を減衰させる対策が講じられてきた。なお経済的理由から防振壁や溝よりも柱列杭が有効とされている。しかし波動の遮蔽に有効な杭の深さや工法・素材に関する議論は行われてきたものの、杭の周期的配置が防振性能に及ぼす影響に関する検討はない。そのため当研究室<sup>1)</sup>では、深さ方向に半無限長の杭を周期的に配置したモデルを対象に、配置パターンが『波動の伝播しない周波数帯』=『ストップバンド』の分布に与える影響について調べた。しかし実際の杭は有限長であり、過剰な深さの杭は経済性に劣る。そこで本研究では、有限長杭をモデル化し、柱列の配置と深さが分散特性に及ぼす影響について調べる。

なお、本研究では、文献1)と同様に  $(x, y)$  面内に対して解を有限要素により離散近似し、深さ方向については波数展開する方法を採用する。

### 2. 対象とする問題と解法

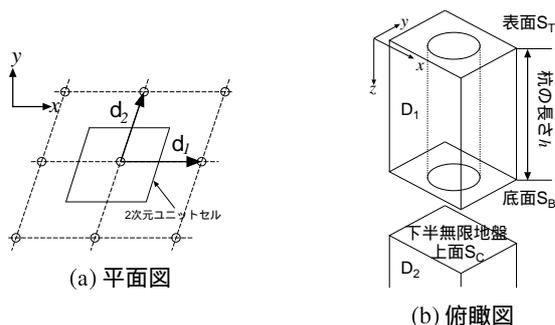


図1 二重周期性を有する半無限場の平面図と俯瞰図

図1(a)に示す様に  $d_1, d_2$  で規定された周期条件の下、有限深さ  $h$  の杭が配置されている問題を考える。なお、本研究における解析領域は、深さ方向に長さ  $h$  の3次元ユニットセル  $D_1$  とその下に位置する半無限長ユニットセル  $D_2$  により与えられる(図-1)。定常解  $u$  は Bloch の定理を満たし、 $d_1, d_2$  方向に向かい合う境界上の点  $(i, i')$  と  $(j, j')$  に対して次の関係が成り立つ。

$$u_{i'} = e^{-ik \cdot d_1} u_i, \quad u_{j'} = e^{-ik \cdot d_2} u_j \quad (1)$$

ここで  $r = (x, y, z)$ ,  $k$  は  $(x, y)$  面内の波数ベクトルである。これにより、当該周期場の定常解は式(1)の境界条件の下で、1ユニットセル内の動弾性問題に帰着して求めることができる。式(1)を満たすユニットセル内の解を次式のように構成する。

$$u(r) = [N(\bar{r})] \{U\} e^{-i(k \cdot \bar{r} + \beta z)} \quad (2)$$

ここで  $\bar{r} = (x, y)$ ,  $[N(\bar{r})]$  は補間関数を成分とした行列、 $\{U\}$  は変位に関する節点ベクトル、 $\beta$  は  $z$  方向波数である。式(2)の様に、 $z$  方向に波数展開し、 $(x, y)$  平面内については波数ベクトル  $k$  で与えられる平面波表現と有限要素による離散化とを併用する。 $\{U\}$  は図1(a)の二次元ユニットの境界辺において、 $(i, i')$  と  $(j, j')$  に対し周期条件を満たす様に与えるものとする。このとき、式(2)の  $u$  は式(1)の条件を自動的に満たすこととなる。

対象としている問題の波動解  $\{U\}$  を求めるため、式(2)と有限要素方程式から  $\beta$  に関する固有値問題を解き、固有値  $\beta$  と固有モード  $\{\Phi\}$  を求める<sup>1)</sup>。

これにより地表面と杭底面における波動解  $\{U\}$  と節点力ベクトル  $\{F\}$  の関係を次式で表すことができる。なおこれ以降  $(\cdot)_T, (\cdot)_B, (\cdot)_C$  は図1(b)の  $D_1$  ユニット表面  $S_T, D_1$  ユニット底面  $S_B$ , それに接する下半無限地盤上面  $S_C$  に関するベクトル、行列成分を示す。

$$\begin{Bmatrix} F_T \\ F_B \end{Bmatrix} = [B\Phi^{-1}] \begin{Bmatrix} U_T \\ U_B \end{Bmatrix} = [K] \begin{Bmatrix} U_T \\ U_B \end{Bmatrix} \quad (3)$$

また、表面応力ゼロの条件から  $\{F_T = 0\}$  であり、 $D_1$  ユニット底面  $S_B$  とそれに向き合う下半無限地盤上面  $S_C$  の適合条件から  $\{F_B\} = -\{F_C\} = -[K_C]\{U_B\}$  を課すことで、次の関係式を得る。

$$\begin{vmatrix} K_{TT} & K_{TB} \\ K_{BT} & K_{BB} + K_C \end{vmatrix} = 0 \quad (4)$$

以上より表面波モードの分散曲線は、上式を満たす波数、周波数空間の点集合を探索することで求められる。

Key Words: 波動, 表面波, 防振杭

連絡先: 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地 TEL 025 (262) 7028 FAX 025 (262) 7021

### 3. 解析

介在物(柱列杭)は,1ユニットの一辺の長さ  $\alpha$  に対して杭径が  $0.5\alpha$ , 長さが  $h$  の円柱とする. なお介在物のポアソン比以外の材料定数の値は地盤の各材料定数との比により無次元で表されている(表1). また波数・周波数は,無次元波数  $\bar{k} = k\alpha$ ・無次元周波数  $\bar{\omega} = \alpha\omega/C_T$  を用いて表す.

#### (1) 解析条件

介在物の材料を鉄筋コンクリートとし,柱列杭を正方格子状配置したものを解析条件(i)とする. また,介在物の配置を三角形八ニカム状に周期的な配置をしたものを解析条件(ii)とする. この時八ニカム格子は半無限長杭に対し完全なストップバンドを持つため<sup>1)</sup>波動の遮蔽に有効な配置であると考えられる. さらに,地盤よりも密度・せん断弾性係数の低い低剛性材料が防振杭として正方格子状に配置されている場合を解析条件(iii)とする. この時の各解析波数領域は,正方格子状配置ならば図2(a),三角形八ニカム状配置は図2(b)の逆格子空間における三角形  $\Gamma XM$  の辺  $\Gamma - X - M - \Gamma$  上となる.

表1 各解析条件における材料パラメータ

	ポアソン比 $\nu$	せん断弾性係数 $G$	質量密度 $\rho$
母材(地盤)	0.4	1	1.0
解析条件(i)の介在物(杭)	0.2	10	1.5
解析条件(ii)の介在物	0.2	10	1.5
解析条件(iii)の介在物	0.2	0.1	0.2

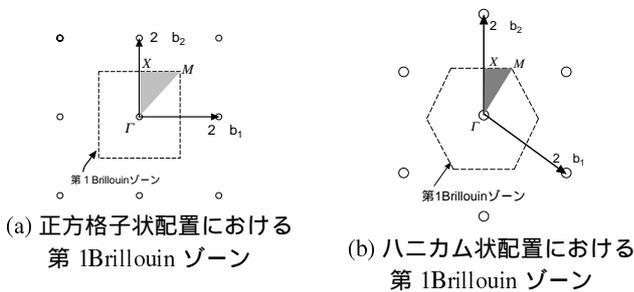


図2 逆格子空間における Brillouin ゾーン

#### (2) 解析結果

いずれの解析条件においても表面波モードの分散曲線は図2の点Mにあたる波数で一番高い周波数を示し,高周波数域に存在する擬表面波モードはP・SV・SH波を含むバルク波に沿って現れ,図2の辺XMの中点付近(図3~図5の点D)にあたる波数で最も低い周波数を示している. なお図3~図5はいずれも杭の長さ  $h = 2\alpha$  における分散曲線である.

各分散曲線の中でも図4は表面波と擬表面波の間にストップバンドが確認できる. この解析条件(ii)において杭の長さを変化させた時,点Mの表面波の周波数と点Dの擬表面波の周波数により決まるストップバンド幅は図6となる. 図6より解析条件(ii)では,杭の長さが  $h = 2\alpha$  程度で半無限長の杭と同等の遮蔽性能を持つことがわかる. この杭長は,表面波の波長と同じ長さである. 既往の研究<sup>2,3)</sup>では,半

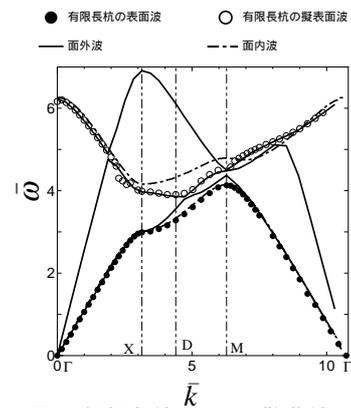


図3 解析条件(i)の分散曲線

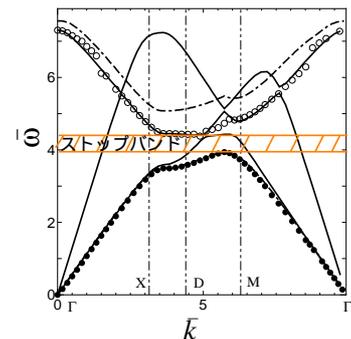


図4 解析条件(ii)の分散曲線

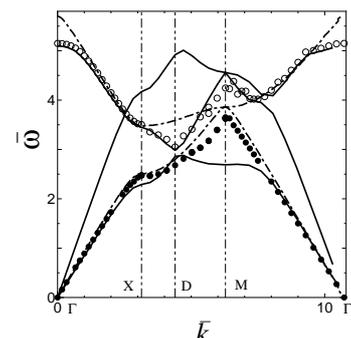


図5 解析条件(iii)の分散曲線

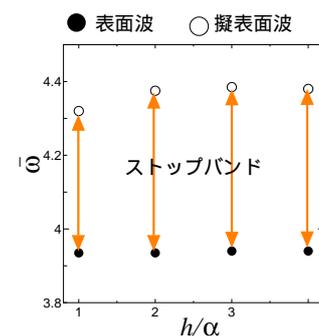


図6 杭長がストップバンド幅に及ぼす影響(ii)

無限長の杭と同等の性能を得るには,杭の長さは表面波の波長の1~2倍程度が必要との結果が示されており,分散曲線の観点からこれらと符合する結果が得られた.

#### 参考文献

- 1) 阿部和久, 荒木聡秀, 紅路一寛: 二重周期弾性場の有限要素表面波分散解析, 土木学会論文集 A2, Vol.67, No.2, I 905-I 913, 2011.
- 2) 東海旅客鉄道(株) 神田仁, 石井啓稔, 阪本泰士, 日本コンクリート工業(株) 川村淳一, 平川泰行, 伊藤康宏: 起振動実験から得られたPC柱列壁の防振効果について, 土木学会第59回年次学術講演, 2004.
- 3) Avilés, J. and Sánchez-Sesma, F.J.: Foundation isolation from vibrations using piles as barriers, *J. Engng. Mech.* (ASCE), **114**, 1854-1870, 1988.